第 39 卷 第 4 期
2021 年 12 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 39, No. 4
Dec., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.04.06

# 基于协方差分析研究 VGOS 不同频段组合对群时延精度的影响

黄逸丹[1,2]，舒逢春[1,3,4,5]，吴 德[1,2]，郑为民[1,3,4,5]

(1. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 2. 中国科学院大学，北京 100049； 3. 国家基础学科公共科学数据中心，北京 100190； 4. 中国科学院 射电天文重点实验室，南京 210008； 5.上海市导航定位重点实验室，上海 200030)

**摘要：** VLBI 全球观测系统 (VLBI Global Observing System, VGOS) 是新一代的测地 VLBI 系统，在 2∼14 GHz 频率范围内可自由选择最多 4 个频段开展观测。有别于传统测地 VLBI 系统采用 S/X 双频观测消除电离层效应，由于 VGOS 超宽带观测的频率范围跨度很大，必须根据多个频段的干涉条纹同时提取群时延观测量和差分电离层总电子含量。通过在干涉测量相位模型中引入电离层效应，基于协方差分析方法对群时延精度进行了定量计算，研究了 VGOS 不同频段组合对群时延精度的影响。利用国际 VGOS 实测数据对群时延精度进行了统计分析，结果表明群时延实测精度与理论分析一致，验证了时延精度计算方法的有效性。本方法可用于 VGOS 超宽带频率序列的选择和优化。

**关 键 词：** VLBI；VGOS；超宽带；群时延；差分总电子含量

**中图分类号：** P228.6 **文献标识码：** A

## 1 引 言

20 世纪 60 年代末，射电天文学家提出甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 技术[1]。经过数十年的发展，VLBI 台站定位精度从米量级提高到亚厘米水平[2]。VLBI 精度的提高主要归功于带宽综合技术[3]、用于仪器时延改正的校正系统[4]和用于消除电离层影响的双频观测策略等。

随着电子设备、全球光纤网络和低成本天线等领域的技术发展，21 世纪初国际 VLBI 大地测量与天体测量服务组织 (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry,

**收稿日期：** 2021-03-03； **修回日期：** 2021-04-14

**资助项目：** 国家自然科学基金 (11573056, 12073065, 11973011)；国家基础科学数据共享服务平台 (DKA2017-12-02-09)；中科院关键技术人才项目 (Y787091009)；上海市领军人才 (Y557301001)

**通讯作者：** 舒逢春，sfc@shao.ac.cn

IVS[5, 6]) 提出了下一代测地 VLBI 系统的构想[7]，2012 年正式命名为VLBI全球观测系统 (VLBI Global Observing System, VGOS)，以适应未来天体测量与大地测量的高精度需求。

2003 年，IVS 成立了专门的工作组 WG3 对下一代测地 VLBI 系统的需求进行调研[2]，2005 年 9 月，WG3 提出 VGOS 的目标为：(1) 全球尺度实现台站位置和 EOP 连续监测；(2) 24 h 快速数据处理；(3) 台站位置精度达到 1 mm[8]。为了实现上述目标，VGOS 采用一系列措施减少时延观测量的系统误差和随机误差影响。为了减少随机误差，VGOS 采用口径约为 12 m 的天线，以缩短单个射电源的观测时间，增加参考源的全天区覆盖率；在 2~14 GHz 频率范围内可自由选择最多 4 个频段开展观测，以增加观测的有效带宽。新的宽带群时延精度预期为 4 ps[7, 9]。

测地 VLBI 观测中，群时延精度与有效带宽和信噪比有关，而信噪比取决于通道数、单通道带宽、观测时长、台站的系统等效流量密度 (SEFD) 以及射电源的相关流量密度等因素。对于特定的基线、目标射电源和观测时长来说，频率设置是影响群时延观测精度的主要因素。由于超宽频带的使用，还需解决色散效应带来的电离层影响，在得到群时延观测量的同时拟合基线的差分总电子含量 ($dTEC$)[10, 11]。宽带群时延与 $dTEC$ 具有很强的相关性[12]，在分析 VGOS 的宽带群时延精度时需考虑 $dTEC$ 的影响。

通过在干涉测量相位模型中引入 $dTEC$ 参数，我们建立了一种基于协方差分析对群时延精度进行计算的方法，并利用国际 VGOS 实测数据进行了群时延精度的统计分析和检验。该方法可在一系列频率设置预选方案中，比较不同频率组合的优缺点，为 VGOS 观测的频率选择和设置提供参考。

## 2　干涉测量相位模型中引入 $dTEC$ 参数的群时延精度计算方法

VLBI 观测中，一般记录多个频率通道的数据，将多通道数据组合在一起进行带宽综合解算，得到多通道的基线群时延观测量。对于 VGOS 的超宽带频率观测，不能忽略电离层的色散效应影响，因此在拟合群时延的同时，引入新的观测量 $dTEC$，干涉测量相位模型可表示为[12]：

$$\phi(f) = \tau_g(f - f_0) + \phi_0 - 1.3445dTECf^{-1} \quad , \tag{1}$$

其中，$\phi$ 为相位 (单位为周)，$f$ 为频率 (单位为 GHz)，$f_0$ 为参考频率 (单位为 GHz)，$\tau_g$ 为群时延 (单位为 ns)，$\phi_0$ 为参考频率处的相位 (单位为周)，$dTEC$ 为差分电离层总电子含量 (单位为 TECU)。

根据线性最小二乘原理，参数解算系数矩阵 $A_{ij}$ 可表示为：

$$A_{ij} = \sum_k \frac{1}{\rho_k^2} \frac{\partial \phi}{\partial \beta_i} \frac{\partial \phi}{\partial \beta_j} \quad , \tag{2}$$

其中，$k$ 表示通道号，$\rho_k$ 表示第 $k$ 通道的权重，参数 $\beta_1$, $\beta_2$ 和 $\beta_3$ 分别表示 $\tau_g$, $\phi_0$ 和 $dTEC$，它们的偏导数为：

$$\frac{\partial \phi}{\partial \beta_1} = \frac{\partial \phi}{\partial \tau_g} = f_k - f_0 \quad , \tag{3}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \beta_2} = \frac{\partial \phi}{\partial \phi_0} = 1 \quad , \tag{4}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \beta_3} = \frac{\partial \phi}{\partial dTEC} = \frac{b}{f_k} \quad , \tag{5}$$

式中 $b = -1.344\,5$。因此 $A_{ij}$ 可表示为：

$$A_{ij} = \sum_k \frac{1}{\rho_k^2} \begin{bmatrix} (f_k - f_0)^2 & f_k - f_0 & b\frac{f_k - f_0}{f_k} \\ f_k - f_0 & 1 & \frac{b}{f_k} \\ b\frac{f_k - f_0}{f_k} & \frac{b}{f_k} & \frac{b^2}{f_k^2} \end{bmatrix} \quad . \tag{6}$$

参数的中误差 $\sigma_i$ 为：

$$\sigma_i = \sqrt{A_{ii}^{-1}}, \tag{7}$$

其中，$\sigma_1$, $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 分别表示 $\tau_g$, $\phi_0$ 和 $dTEC$ 的中误差。

## 3 理论计算分析

在利用实际观测数据验证本文方法的理论计算中，我们选择代码为 vo0009 的实际 VGOS 观测的 4 个频段 (3 GHz, 5 GHz, 6 GHz 和 10 GHz) 组合成 5 种频率设置模式。每个频段有 8 个频率通道，每个通道带宽为 32 MHz，天空频率如表 1 所示。天空频率表示从观测纲要文件 (vex 文件) 中读取的射频频率，VGOS 观测中采用下边带 (LSB)，以第 1 通道天空频率 3 032.40 MHz 为例，表示该通道的频率范围为 3 000.40~3 032.40 MHz。本文用 A, B, C 和 D 分别代表 3 GHz, 5 GHz, 6 GHz 和 10 GHz 频段。

**表 1 天空频率设置**

MHz

| A 频段 | B 频段 | C 频段 | D 频段 |
|---|---|---|---|
| 3 032.40 | 5 272.40 | 6 392.40 | 10 232.40 |
| 3 064.40 | 5 304.40 | 6 424.40 | 10 264.40 |
| 3 096.40 | 5 336.40 | 6 456.40 | 10 296.40 |
| 3 224.40 | 5 464.40 | 6 584.40 | 10 424.40 |
| 3 320.40 | 5 560.40 | 6 680.40 | 10 520.40 |
| 3 384.40 | 5 624.40 | 6 744.40 | 10 584.40 |
| 3 448.40 | 5 688.40 | 6 808.40 | 10 648.40 |
| 3 480.40 | 5 720.40 | 6 840.40 | 10 680.40 |

5 种频率设置组合模式如表 2 所示，模式 1 包含了 A, B, C 和 D 共 4 个频段；模式 2 包含 B, C 和 D 共 3 个频段，缺失 A 频段；模式 3 包含 A, C 和 D 共 3 个频段，缺失 B 频段；模式 4 包含 A, B 和 D 共 3 个频段，缺失 C 频段；模式 5 包含 A, B 和 C 共 3 个频段，缺失 D 频段。其中模式 1 共 32 个频率通道，模式 2~5 皆为 24 个频率通道。

**表 2　5 种模式的频率设置组合情况**

| 频率设置模式 | A 频段 | B 频段 | C 频段 | D 频段 |
|---|---|---|---|---|
| 模式 1 | 有 | 有 | 有 | 有 |
| 模式 2 | — | 有 | 有 | 有 |
| 模式 3 | 有 | — | 有 | 有 |
| 模式 4 | 有 | 有 | — | 有 |
| 模式 5 | 有 | 有 | 有 | — |

式 (6) 中的权值主要与该通道信噪比有关，单通道信噪比与射电源的相关流量密度、两个测站的系统等效流量密度 (SEFD)、单通道带宽以及积分时间有关[16]。对同一基线观测同一颗射电源，单通道带宽与积分时间相同，射电源的相关流量密度和测站 SEFD 对不同频率通道的影响复杂，很难量化，因此本文在假设单通道信噪比相同的前提下，将公式 (6) 中的权 $\rho_k$ 设为相同值 (等权)。根据公式 (6) 和 (7)，我们在等权情况下计算了 5 种频率设置模式中参数 $\tau_g$, $\phi_0$ 和 $dTEC$ 的中误差，见表 3。表 3 第 2 列为 5 种频率设置模式下的理论有效带宽，第 3 列为通道数，第 4 列为群时延中误差，第 5 列为参考相位中误差，第 6 列为 $dTEC$ 中误差，第 7 列为群时延与 $dTEC$ 的相关系数。有效带宽计算公式如下：

$$B = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{N}(f_i - \bar{f})^2}{N}} \ , \tag{8}$$

其中 $N$ 为通道数，$f_i$ 为第 $i$ 个通道的天空频率，$\bar{f}$ 为天空频率的平均值。

**表 3　由相位模型估计的群时延、参考相位及 $dTEC$ 的中误差**

| 频率设置模式 | 有效带宽 /MHz | 通道数 | 群时延中误差 /ns | 参考相位中误差 /rot | $dTEC$ 中误差 /TECU | 群时延与 $dTEC$ 相关系数 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 模式 1 | 2 612.4 | 32 | 0.179 2 | 1.694 8 | 4.461 5 | 0.926 0 |
| 模式 2 | 2 130.5 | 24 | 0.635 8 | 6.803 7 | 28.089 6 | 0.988 6 |
| 模式 3 | 2 946.3 | 24 | 0.224 1 | 2.174 1 | 5.452 4 | 0.951 0 |
| 模式 4 | 3 013.1 | 24 | 0.209 6 | 2.097 4 | 5.375 9 | 0.946 3 |
| 模式 5 | 1 406.7 | 24 | 0.885 6 | 5.727 3 | 13.578 1 | 0.986 5 |

从表 3 中可以看出，不同频率设置模式的群时延中误差是有差异的，即不同的观测频率设置会影响群时延精度。其中模式 1 的群时延误差最小，群时延拟合精度最高，接下来的群时延误差从小到大的顺序是：模式 4、模式 3、模式 2 及模式 5，也就是说，在 VGOS 观测

中，对群时延精度影响最大的频段分别为：D, A, B 和 C。模式 3 和 4 虽然有效带宽比模式 1 略大，但是考虑到通道数量减少带来的信噪比损失，这两种模式的群时延中误差仍然比模式 1 稍大。第 7 列统计了宽带群时延与 $dTEC$ 的相关性，当缺失 A 频段 (模式 2) 时，宽带群时延与 $dTEC$ 的相关性最大；其次是缺失 D 频段 (模式 5)；相关性最小的是 4 频段组合 (模式 1)。

值得注意的是，本文假设每个通道信噪比皆相同，将式 (6) 不同通道的权值设为相等值，因此，群时延精度的理论估计值，仅用于不同频率设置模式下的相对比较，不能对群时延精度进行绝对评估。其目的旨在分析不同频率设置模式对群时延精度影响的相对大小，用于观测频率的选择。但第 4 章实测数据处理的结果基于实测信噪比，包含了通道数、带宽、积分时间、测站天线的系统等效流量密度、射电源相关流量密度等所有信息，可以用于计算群时延的实际测量精度。

## 4 实测数据处理

vo0009 是一次 24 h 的 VGOS 观测，观测时间从 2020 年 1 月 9 日 UTC 18:00 至 2020 年 1 月 10 日 18:00，共观测了 71 个射电源。参与观测的 6 个台站分别为美国的 GGAO12M(Gs) 站、Westford(Wf) 站[14, 15]、德国的 WETTZ13S(Ws) 站[17]、日本的 ISHIOKA(Is) 站[18, 19]、瑞典的 ONSA13NE(Oe) 和 ONSA13SW(Ow)[20] 站，见图 1。

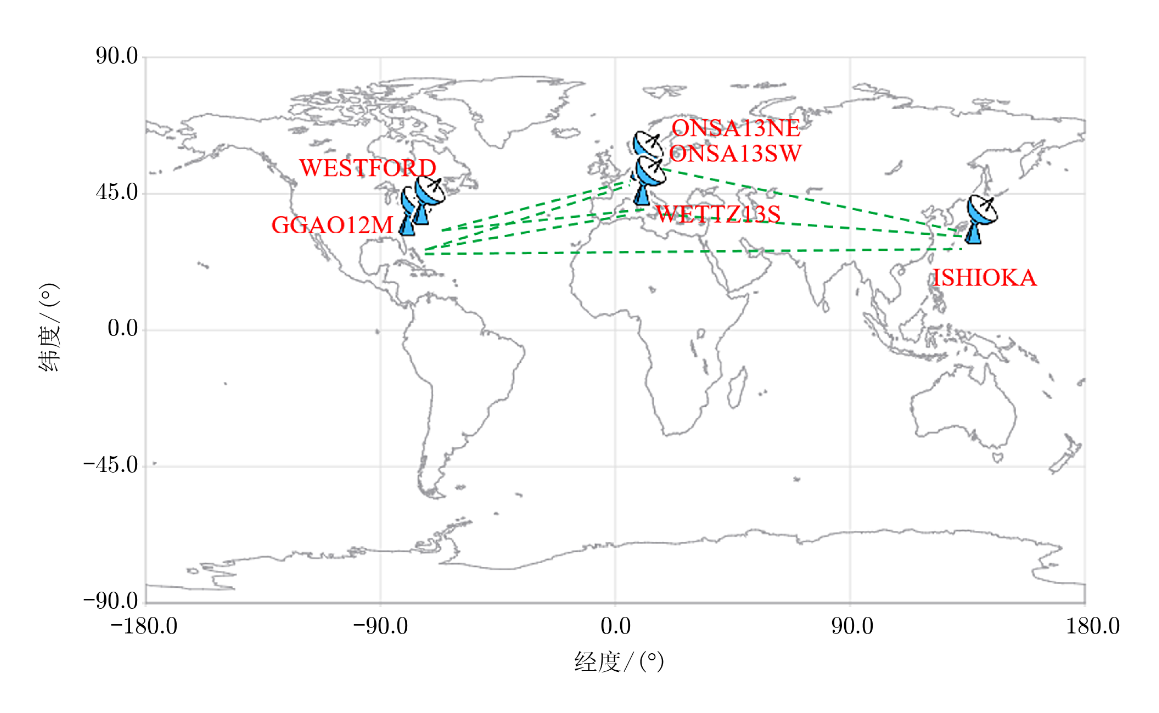



图 1 vo0009 观测台站分布图

本文利用中国科学院上海天文台的相关处理机平台对原始数据进行了相关处理，用 HOPS[21] 软件对本次观测所有基线的相关数据进行了后处理，得到每条基线所有 scan 的群时延观测量及误差。本次观测 4 个频段的频率设置与表 1 一致，每个通道的带宽为 32 MHz。

我们处理了表 2 中 5 种频率设置模式的数据，考虑到某些通道信号幅值过低、相位校正信号 (PCAL) 质量不好以及条纹较差等因素的影响，本文仅统计了条纹拟合过程中质量因子高于 5 的观测量。

群时延精度与射电源的相关流量密度有关，而射电源的相关流量密度又与射电源的总流量密度和基线的长短有关。基线越长，射电源的相关流量密度越小，信噪比也越小，群时延精度越低；反之，基线越短，射电源的相关流量密度则越大，信噪比也越大，群时延精度越高。我们处理了 vo0009 观测所有基线的实测数据。为说明不同基线长度的情况，本文展示了最长基线 Gs-Is (9 593 km) 以及短基线 Gs-Wf (600 km) 所有 scan 的群时延误差的统计结果。其他基线的结果由于篇幅所限，本文未做展示。

### 4.1 以最长基线 Gs-Is 为例

VGOS 的设计目标是群时延拟合精度等于或优于 4 ps。我们处理了 vo0009 观测中最长基线 Gs-Is (9 593 km) 的相关数据，得到了不同频率设置模式下所有 scan 的群时延误差值，并做了统计 (见表 4)。Gs-Is 基线在模式 1、模式 2、模式 3、模式 4 以及模式 5 中的有效观测量分别为 503, 530, 492, 491 以及 511 个。为便于对比，采用了5 种模式的 480 个共有观测量进行统计分析。

表 4 给出了 Gs-Is 基线 5 种模式对群时延误差影响的统计情况：第 3 列为群时延误差小于 4 ps 的观测量百分比；第 4 列为群时延误差中值；第 5 列为以模式 1 为基准，其他模式群时延误差与模式 1 群时延误差比值的时间序列均值；第 6 列为以模式 1 为基准，其他模式群时延误差与模式 1 群时延误差比值的时间序列标准差。

**表 4　Gs-Is (9 593 km) 基线不同频率设置情况对群时延误差影响统计**

| 频率设置模式 | 频段 | 群时延误差小于 4 ps 的观测量百分比 | 群时延误差中值 /ps | 群时延误差比例因子均值 | 群时延误差比例因子标准差 |
|---|---|---|---|---|---|
| 模式 1 | 四频段 | 64% | 3.4 | 1.0 | |
| 模式 2 | 缺失 A 频段 | 11% | 10.2 | 3.1 | 0.35 |
| 模式 3 | 缺失 B 频段 | 50% | 4.0 | 1.2 | 0.06 |
| 模式 4 | 缺失 C 频段 | 54% | 3.9 | 1.1 | 0.09 |
| 模式 5 | 缺失 D 频段 | 2% | 14.4 | 4.3 | 0.70 |

从表中可以看出，当基线长度大于 9 000 km 时，基于模式 1 的观测有 64% 的群时延误差在 4 ps 以内，群时延误差中值为 3.4 ps，满足 VGOS 群时延的设计目标。基于模式 5 的观测，仅 2% 的 scan 群时延误差在 4 ps 以内，群时延误差中值为 14.4 ps，远远低于 VGOS 的预期；基于模式 5 的观测，11% 的 scan 群时延误差在 4 ps 以内，群时延误差中值为 10.2 ps，亦不能满足 VGOS 的预期；而基于模式 3 和 4 的观测，群时延误差在 4 ps 以内

的 scan 百分比分别为 50% 和 54%，群时延误差中值分别为 4.0 ps 和 3.9 ps，可满足 VGOS 的预期。图 2 较直观地显示了 5 种频率设置模式在不同时延误差区间的观测数，横轴为群时延误差，纵轴为群时延误差区间的累计数目。

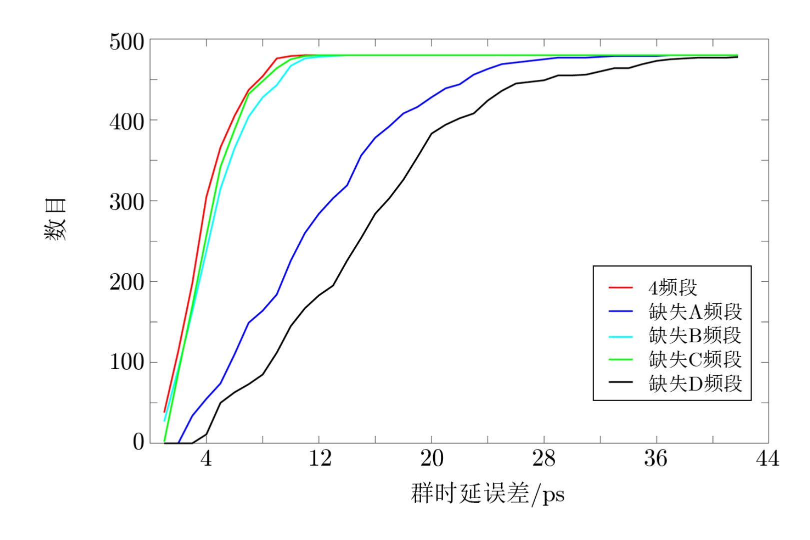



图 2 Gs-Is (9 593 km) 基线不同频率设置模式的群时延误差累计数目分布

从表 4 和图 2 对实际数据的处理情况分析可以看出，5 种模式的群时延误差由小到大的顺序为：模式 1、模式 4、模式 3、模式 2 和模式 5；对应 4 个频段对群时延精度影响从大到小的顺序为：D, A, B 和 C。与第 3 章的理论分析一致。

### 4.2 以短基线 Gs-Wf 为例

同样地，我们处理了 vo0009 观测中短基线 Gs-Wf (600 km) 的相关数据，得到了 5 种不同频率设置模式下所有 scan 的群时延误差值，统计情况见表 5，表中每列含义与表 4 相同。Gs-Wf 基线在模式 1、模式 2、模式 3、模式 4 以及模式 5 中的有效观测量分别为 684, 680, 682, 681 以及 686 个。为便于对比，采用了 5 种模式的 674 个共有观测量进行统计分析。

表 5 Gs-Wf (600 km) 基线不同频率设置情况对群时延误差影响统计

| 频率设置模式 | 频段 | 群时延误差小于 4ps 的观测量百分比 | 群时延误差中值 /ps | 群时延误差比例因子均值 | 群时延误差比例因子标准差 |
|---|---|---|---|---|---|
| 模式 1 | 四频段 | 99% | 1.5 | 1.0 | |
| 模式 2 | 缺失 A 频段 | 45% | 4.3 | 2.9 | 0.13 |
| 模式 3 | 缺失 B 频段 | 96% | 1.8 | 1.2 | 0.02 |
| 模式 4 | 缺失 C 频段 | 98% | 1.6 | 1.1 | 0.04 |
| 模式 5 | 缺失 D 频段 | 30% | 5.5 | 3.8 | 0.35 |

表 5 显示，本次观测中的基线 Gs-Wf 基于模式 1 有 99% 的群时延误差在 4 ps 以内，群时延误差中值为 1.5 ps，满足 VGOS 群时延的设计目标。基于模式 3 和 4，群时延误差在

4 ps 以内的 scan 百分比分别为 98% 和 96%，群时延误差中值分别为 1.6 ps 和 1.8 ps，与模式 1 相比，群时延误差在 4 ps 以内的观测数略小，群时延误差略大。基于模式 2，仅 45% 的 scan 群时延误差在 4 ps 以内，群时延误差中值为 4.3 ps，接近 VGOS 的预期；基于模式 5，仅 30% 的 scan 群时延误差在 4 ps 以内，群时延误差中值为 5.5 ps，未达到 VGOS 的预期。图 3 显示了 Gs-Wf 基线在 5 种频率设置模式下不同时延误差区间的观测数，横轴为群时延误差，纵轴为群时延误差区间的累计数目。

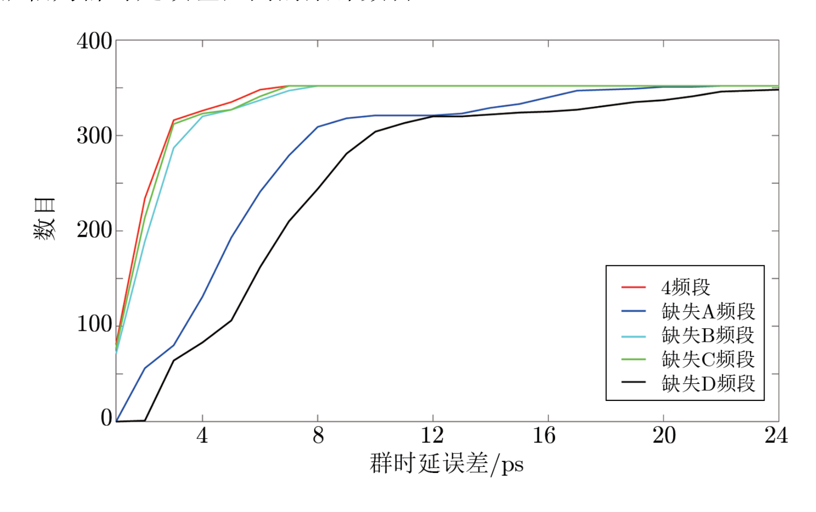



**图 3　Gs-Wf 基线不同频率设置模式的群时延误差累计数目分布**

从表 5 和图 3 可以看出，5 种模式的群时延误差由小到大的顺序为：模式 1、模式 4、模式 3、模式 2 和模式 5，对应 4 个频段对群时延精度影响从大到小的顺序为：D, A, B 和 C。规律与 Gs-Is 基线的统计结果一致，且与第 3 章的理论分析相符。

### 4.3　其他基线

我们还处理了 vo0009 观测的其他基线，由于篇幅所限，具体结果本文未做展示。值得指出的是，其他基线的统计结果与 Gs-Is, Gs-Wf 基线的规律一致，且与第 3 章的理论分析相符。

## 5　结论与讨论

传统测地 VLBI 采用 S/X 双频观测消除电离层效应，VGOS 观测由于频率范围跨度很大，必须根据多频段干涉条纹同时提取群时延观测量和差分电离层时延。本文采用了一种基于 VGOS 超宽带频率序列的协方差分析方法，通过在干涉测量相位模型中引入电离层参数，研究了不同频率组合对群时延精度的影响。

基于代码为 vo0009 的国际 VGOS 观测，设计了 5 种频率组合模式，从理论上计算不同模式对宽带群时延精度的相对影响。接着处理了本次观测所有基线的实际观测数据，由于篇幅所限，本文仅展示了长基线和短基线的实测数据分析结果。我们统计了 5 种频率组合模式

下宽带群时延误差的实测结果，与理论分析一致，验证了本文方法的可靠性。

VGOS 观测通常采用 4 个频段和固定的频率设置，但有时候也需要针对实际观测条件进行观测频率调整，例如，有的参加台站需要避免特定频段的无线电干扰，有的台站只能记录 3 个频段，有时候 VGOS 台站与传统 VLBI 台站开展混合模式观测。上述情况下，都需要重新设计观测频率，本文方法可为 VGOS 观测频率的选择和设置提供参考。

每个通道信噪比与射电源的相关流量密度、台站 SEFD 等因素有关，由于这些影响因素的复杂性，无法具体量化，因此本文的理论计算忽略了上述因素对不同频率通道条纹信噪比的影响。此外，本文未考虑时延分辨率函数第 2 旁瓣峰值对群时延模糊度的影响。后续将考虑上述因素，进一步优化 VGOS 频率的设置方法。

## 致谢

感谢美国 Haystack 天文台提供 VGOS 实测数据，为本文开展 VGOS 数据的相关后处理和群时延精度计算提供了便利。



## 参考文献：

[1] Thompson A R, Moran J M, Swenson G W JR. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. New York: Wiley-Interscience publication, 2001: 304
[2] Niell A, Barrett J, Cappallo R, et al. Radio Science, 2018, 53: 1269
[3] Rogers A E E. Radio Science, 1970, 5: 1239
[4] Rogers A E E, Cappallo R J, Hinteregger H F, et al. Science, 1983, 219: 51
[5] Schuh H, Behrend D. Journal of Geodynamics, 2012, 61: 68
[6] Behrend D. Data Science Journal, 2013, 12: 81
[7] Petrachenko B, Niell A, Behrend D, et al. Progress Reports of the IVS VLBI2010 Committee, US: NASA, 2009: 13
[8] Hase H, Behrend D , Ma C, et al. IVS 2012 General Meeting, Spain: NASA, 2012: 8
[9] Niell A E, Whitney A R, Petrachenko B, et al. 2005 IVS Annual Report 13 - 40, 2005: 1
[10] Cappallo R. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2014 General Meeting Proceedings. Beijing: Science Press, 2014: 91
[11] Cappallo R. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2016 General Meeting Proceedings. Cape Twon: New Horizons, 2016: 61
[12] Cappallo R. Covariance Analysis of the Simultaneous Fit of Group Delay and dTEC in fourfit. https://www.haystack.mit.edu/wp-content/uploads/2020/07/, 2015
[13] Xu M H, Anderson J M, Heinkelmann R, et al. Journal of Geodesy, 2021, 95: 51
[14] Niell A, Beaudoin C, Bolotin S, et al. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2014 General Meeting Proceedings. Beijing: Science Press, 2014: 97.
[15] Niell A, Cappallo R, Corey B, et al. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2016 General Meeting Proceedings, Cape Twon: New Horizons, 2016: 44
[16] 钱志瀚, 李金岭. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用. 北京:中国科学技术出版社, 2012: 75
[17] Kronschabl G, Neidhardt A, Plotz C, et al. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2016 General Meeting Proceedings. Cape Twon: New Horizons, 2016: 49
[18] Kondo T, Takefuji K. Radio Science, 2016, 10: 1686.

[19] Fukuzaki Y, Tanabe T, Kuroda J, et al. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2014 General Meeting Proceedings. Beijing: Science Press, 2014: 32

[20] Haas R, Casey S, Elgered G, et al. IVS 2018 General Meeting Proceedings, US: NASA, 2018: 17

[21] Cappallo R. fourfit user’s manual.https://www.haystack.mit.edu/wp-content/uploads/2020/07/, 2017

[22] Gorham P W. TMO Progress Report, 1998, 42: 133

# Impacts of Various Frequency Band Combinations on the Uncertainties of VGOS Group Delays Based on Covariance Analysis

HUANG Yi-dan[1,2], SHU Feng-chun[1,3,4,5], WU De[1,2], ZHENG Wei-min[1,3,4,5]

*(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Basic Public Science Data Center, Beijing 100190, China; 4. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 5. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China)*

**Abstract:** As the next-generation VLBI system for geodesy and astrometry, VLBI Global Observing System (VGOS) is able to observe at four frequency bands in the range 2∼14 GHz. Due to the super wide bandwidth of the VGOS system, it is necessary to determine broadband group delay and differential ionospheric total electron content observables simultaneously during the coherent fringe fitting by combining all the bands. In this work, we performed a covariance analysis for evaluating the uncertainties of broadband group delay for VGOS and obtained the uncertainties of group delays for various frequency band combinations. We also processed the real VGOS observations using fourfit and made a statistical analysis. The results show that the uncertainties derived from covariance analysis agree with those obtained from actual observations, and thus it validates the method that we presented. This method can be useful for selecting and optimizing frequency sequences for VGOS observations.

**Key words:** VLBI；VGOS；broadband；group delay；dTEC